



TITLE:

Effect of Hydraulic Fracturing Fluid Viscosity  
on Stimulated Reservoir Volume for Shale  
Gas Recovery( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Bennour, Ziad

---

CITATION:

Bennour, Ziad. Effect of Hydraulic Fracturing Fluid Viscosity on Stimulated Reservoir Volume for Shale Gas Recovery. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20338>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-03-01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	BENNOUR Ziad
論文題目	Effect of Hydraulic Fracturing Fluid Viscosity on Stimulated Reservoir Volume for Shale Gas Recovery (シェールガス生産のための亀裂造成にもたらす水圧破碎流体の粘度の影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>地球温暖化の主要な原因とされる CO<sub>2</sub>(二酸化炭素ガス)を火力発電所等の大量発生源で回収して地中に貯留し大気中への放出を防止する方法は、地球温暖化の緊急避難的かつ現実的な対策として重要であるが、経済的にメリットが無い場合税金の投入が必要となる。一方北米を中心に進められているシェールガスの採掘は、緻密で浸透率の小さい岩盤であるシェールを水圧で破碎してガスを採掘するものであるが、この破碎に水ではなく CO<sub>2</sub>を用いれば、シェールガスの採掘と同時に CO<sub>2</sub>の地中貯留を実現することが可能となる。本研究は、CO<sub>2</sub>を用いた水圧破碎のシェールガス開発に対する有用性を、岩石供試体を用いた実験により検討した結果をとりまとめたものであって、全 5 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、CO<sub>2</sub>を用いたシェールガス開発に関する既往の研究事例を調査し、検討すべき課題を抽出している。</p> <p>第 2 章では、破碎流体に CO<sub>2</sub>を用いた場合、従来の水に比べて造成される亀裂がどのように異なるかを明らかにするため、一辺 170 mm の立方体の花崗岩に直径 20 mm の円孔を穿ち、円孔の中央部の 60 mm 区間を密閉して加圧して水圧破碎実験を行った。シェールガス開発が行われる地下 1000～3000m の深部では、その温度、圧力条件から CO<sub>2</sub>は通常超臨界状態となるが、温度が低い特殊な地質状態では液体状態となることもある。そこで破碎流体には超臨界状態の CO<sub>2</sub>(SC-CO<sub>2</sub>)、液体状態の CO<sub>2</sub>(L-CO<sub>2</sub>)、水、粘度の大きな油の 4 種類を用いた。これらの流体の粘度は水が約 1 mPa・s であるのに対し、SC-CO<sub>2</sub>は 0.05mPa・s、L-CO<sub>2</sub>は 0.1 mPa・s、油は 300 mPa・s 程度である。供試体には地下に作用する地圧を模擬して 3 方向から異なる大きさの圧力を作用させ、供試体側面には AE (Acoustic Emission、岩石の微小破壊に伴って放射される弾性波動)を測定するセンサーを 1 面に 4 個ずつ合計 16 個貼りつけた。水圧破碎時の AE の震源分布から造成された亀裂の特徴を、また AE の波形解析から破壊のメカニズム、すなわち引張破壊とせん断破壊のいずれが卓越するかを調べた。その結果、SC-CO<sub>2</sub>や L-CO<sub>2</sub>など粘度が小さい流体ほどせん断破壊が卓越し、3 次元的に広い範囲に分布するシェールガス開発に有利な亀裂が造成されることがわかった。</p> <p>第 3 章では、シェールにおいても花崗岩と同じ結果が得られることを確認するための実験を行った結果をとりまとめている。シェールはわが国では頁岩と呼ばれるが、一般に流通しておらず入手が容易でない。そこで我国で唯一坑内において石炭を採掘している釧路コールマイン(株)から、坑道掘削の際に回収された砂質頁岩の岩石ブ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	BENNOUR Ziad
<p>           ロックの提供を受け、堆積面にほぼ直交する方向にコア抜きして直径 85 mm、長さ 170 mm の円柱形の供試体を作製した。この供試体の中央部の直径方向に直径 10 mm のボーリング孔を穿ち、中央部に 30 mm の加圧区間をつくり、L-CO<sub>2</sub>、水、粘度の大きな油を加圧して供試体を破砕した。載荷条件は、3 MPa の一軸載荷と載荷なしの 2 種類で行ったが、載荷なしの場合には堆積面が弱面となり、載荷軸に直交する水平面に沿って亀裂が進展する場合が多いのに対し、3 MPa の一軸載荷の下では載荷軸方向に亀裂が進展した。シェールガスの開発では、ほぼ水平に近い堆積層に水平ボーリングを掘削して水圧破砕を行うことが多いが、この実験結果から堆積面に直交する初期地圧の大きさにより、水圧破砕亀裂の進展方向が異なる可能性を明らかにした。すなわち、実際には深度が小さく鉛直地圧が小さい貯留層では堆積面に沿って水平方向に亀裂が進展するが、深度が大きく鉛直地圧が大きい貯留層では堆積面に直交して鉛直方向に亀裂が進展する可能性を明らかにした。一方 3 MPa の載荷の下で L-CO<sub>2</sub>、水、粘度の大きな油の 3 種類の流体で水圧破砕を行って測定した AE のうち、多数のセンサーで P 波初動の押し引きが明瞭に読み取れた AE イベント 30 個ずつに対して、破壊のメカニズムを調べたところ、粘度の小さい L-CO<sub>2</sub> や水の場合にはせん断破壊が卓越し、粘度の大きな油の場合には引張破壊の成分を多く含む破砕が生じる傾向がみられた。この結果は第 2 章で取りまとめた花崗岩の場合と調和的であり、亀裂造成メカニズムに対する破砕流体の粘度の影響は、頁岩においても花崗岩と同様の傾向がみられることが明らかとなった。         </p> <p>           第 4 章では、水圧破砕によってシェールガスの浸透性が改善される領域、すなわち、SRV (Stimulated Reservoir Volume) について、第 2 章と第 3 章の実験で得た供試体の亀裂の顕微鏡観察結果をとりまとめて考察している。シェールガスの生産では、SRV の範囲と浸透性の改善度合いが生産性に直接影響を与えるが、SRV は概念として示されているにすぎず、その実態の解明や具体的な評価は十分になされていない。そこで本研究では、実験後の供試体を蛍光剤入りレジンに漬けて容器内部を真空に引き、レジンを亀裂に浸透させたのち加熱して固化させて薄片を作製した。そして薄片の亀裂周辺を顕微鏡で観察し、蛍光剤の発光度に基づいて、SRV の範囲と浸透性の改善度合いを検討した。その結果、CO<sub>2</sub> では水や油に比べて浸透性の改善程度が大きい SRV が造成され、また改善程度が小さい SRV も含めると、CO<sub>2</sub> の場合主亀裂周辺のきわめて広い範囲に SRV が造成されていることを明らかにした。         </p> <p>           第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。         </p>			

( 論文審査の結果の要旨 )

地球温暖化の主要な原因とされる  $\text{CO}_2$  を地下エネルギーの増進回収に有効に利用することができれば、地球温暖化の対策として有効な  $\text{CO}_2$  の地中貯留が同時に実現できるため、環境にやさしい優れた技術となる。本研究は、北米を中心に進められているシェールガスの生産に必要な地下の岩盤の水圧破碎に、従来の水の代わりに  $\text{CO}_2$  を用いるメリットを明らかにする室内実験の結果をとりまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

1. 立方体の花崗岩に円孔を穿ち、 $\text{SC-CO}_2$ 、 $\text{L-CO}_2$ 、水、油の4種類の破碎流体で水圧破碎を行い、破碎時の AE の測定から造成される亀裂の特徴と亀裂造成メカニズムを検討した。その結果、 $\text{SC-CO}_2$  や  $\text{L-CO}_2$  など粘度が小さい流体ほどせん断破壊が卓越し、3次元的に広い範囲に分布するシェールガス開発に有利な亀裂が造成されることを明らかにした。

2. シェール（頁岩）においても花崗岩と同じ結果が得られることを確認するため、釧路の炭鉱から坑道掘削の際に回収された砂質頁岩の岩石ブロックの提供を受け、円柱供試体を作製して、 $\text{L-CO}_2$ 、水、油の3種類の破碎流体で水圧破碎試験を行った。その結果、粘度の小さい  $\text{L-CO}_2$  や水の場合にはせん断破壊が卓越し、粘度の大きな油の場合には引張破壊の成分を多く含む破碎が生じる傾向がみられた。このことから、亀裂造成メカニズムに対する破碎流体の粘度の影響は、頁岩においても花崗岩と同様の傾向がみられることを明らかにした。

3. シェールガスの生産では、水圧破碎による SRV の範囲と浸透性の改善度合いの評価が重要であるため、上記の花崗岩と頁岩の供試体に造成された水圧破碎亀裂に蛍光剤入りレジンを浸透させて顕微鏡で観察し、蛍光剤の発光度に基づいて、亀裂周辺の SRV と浸透性の改善度合を検討した。その結果、 $\text{CO}_2$  では水や油に比べて亀裂周辺の広い範囲に SRV が造成され、浸透性の改善程度が大きいことを明らかにした。

以上のように本論文は、シェールガスの生産に従来の水の代わりに  $\text{CO}_2$  を用いて水圧破碎を行うメリットを、造成される亀裂の性状の観点から明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。